

Ю.В. Батыгин, д-р техн. наук,
А.В. Гнатов, канд. техн. наук,
Е.А. Чаплыгин, канд. техн. наук,
И.С. Трунова,
Щ.В. Аргун,
С.А. Щиголева,
Д.О. Смирнов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ ПОЛЕМ ВИТКА С РАЗРЕЗОМ

Введение

Возбуждение вихревых токов в тонкостенных металлах, в отличие от случая массивных и достаточно хороших проводников, происходит в условиях интенсивного проникновения действующих электромагнитных полей. Исследование этих процессов для магнитно-импульсной обработки металлов – задача, безусловно, весьма актуальная и практически значимая [1]. Доказательством этого являются исследования по разработке магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпусов летательных аппаратов, проводимые на протяжении последних 35–40 лет фирмами Boeing и Electroimpact (США) [2, 3]. Работа этих комплексов основана на притяжении заданных участков листового металла посредством импульсных магнитных полей строго определенной конфигурации, возбуждение которых осуществляется индукторными системами-инструментами обработки. Следовательно, исследование самих индукторных систем и различных ситуаций, связанных с протеканием в них электродинамических процессов, является весьма важной научно-технической задачей.

Прежде чем рассматривать ситуацию в общем случае амплитудно-временных характеристик и электрофизических параметров, целесообразно начать с приближения к идеализации, в которой проводник «прозрачен» для действующих полей. Физически «прозрачный» проводник есть прямая противоположность «идеальному» проводнику. Поэтому анализ процессов возбуждения вихревых токов в физически противоположных идеализациях позволит по максимуму оценить существующие природные различия и очертить круг наиболее интересных направлений в дальнейших исследованиях ситуаций, соответствующих реальным процессам в реальных конструкциях инструментов магнитно-импульсных технологий [2].

Цель настоящего рассмотрения – экспериментальное исследование пространственно-временного распределения вихревых токов, возбуждаемых плоским «незамкнутым» круговым или прямоугольным вит-

ком, расположенным над тонкостенным немагнитным листом металла, при интенсивном проникновении действующих полей.

Экспериментальное оборудование включало в себя регистрирующий и силовой комплексы, а именно, осциллограф, блок компьютерного управления и источник мощности – генератор токовых импульсов (рис.1).

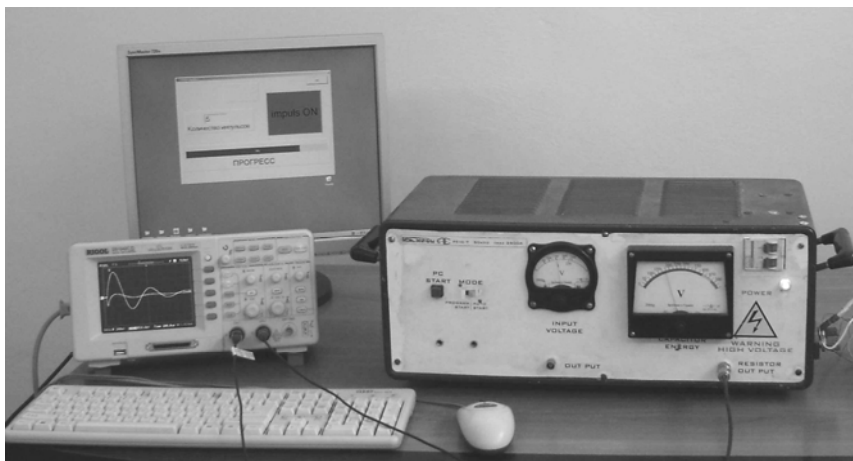


Рисунок 1 – Регистрирующее и силовое экспериментальное оборудование: слева – осциллограф и компьютерный блок для автоматизированного управления, справа – источник мощности, генератор токовых импульсов

Листовые заготовки были выполнены из нержавеющей стали толщиной $d \approx 0,0008 - 0,0001$ м (удельная электропроводность – $\gamma \approx 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м). В поперечном направлении по центру были впаяны электроды для съёма электрических сигналов, характеризующих пространственное распределение индуцированных токов (рис. 2). Данная методика измерения подробно обоснована и описана в работах [1, 4].

Одновитковые индукторы были выполнены из медной проволоки диаметром $g \approx 0,001$ м, круговые – с радиусом $\sim R \approx 0,025$ м, прямоугольные – со сторонами $a \approx 0,025$ м, $b \approx 0,075$ м, квадратные – со сторонами $a \approx b \approx 0,025$ м (рис. 3, величина разреза – $2c \approx 0,002$ м). Витки располагались над образцами на расстоянии $h \approx 0,002 \dots 0,0025$ м.

Типичные осциллограммы сигналов в проводимых экспериментах показаны на рис. 4.

Для обработки экспериментальных данных необходимы зависимости пространственно-временного распределения индуцированных токов. Соответствующие выражения в относительных единицах (нормировка на максимум) могут быть получены аналогично тому, как это было сделано авторами научного издания [2].

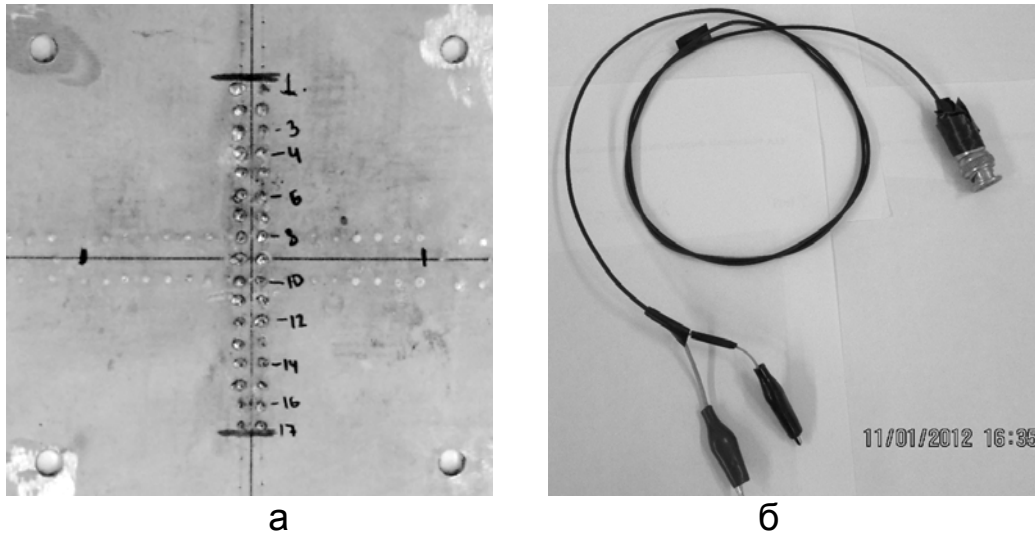


Рисунок 2 – Экспериментальный образец немагнитного листового металла с электрическими выводами для измерения индуцированных токов (а) и кабель подсоединения выводов к осциллографу (б)

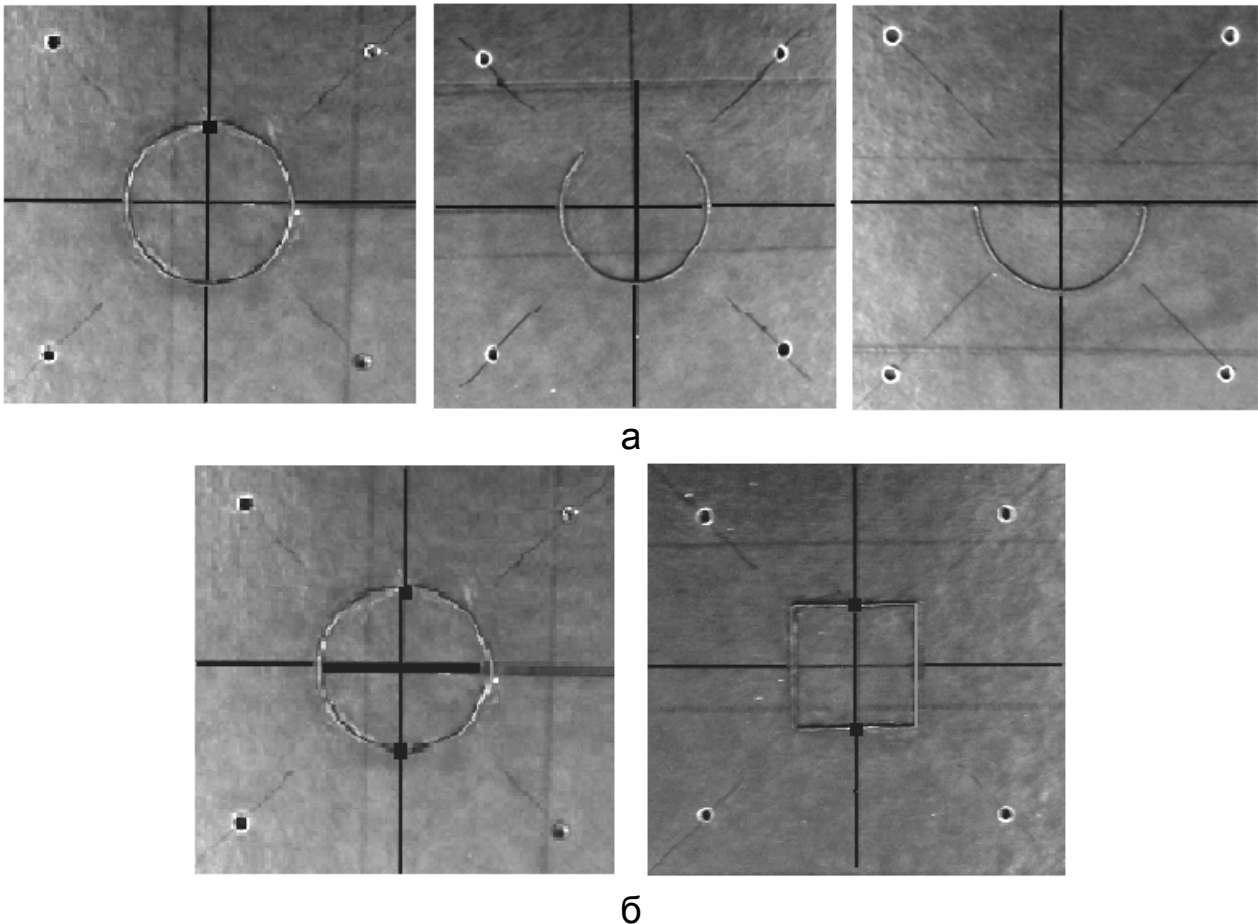


Рисунок 3 – Образцы индукторов – одновитковых соленоидов различной геометрии:

а – круговые витки с разными радиальными разрезами (слева направо $\sim 6^\circ$, 90° , 180°);

б- витки с двумя разрезами (слева – круговой, справа – прямоугольный)

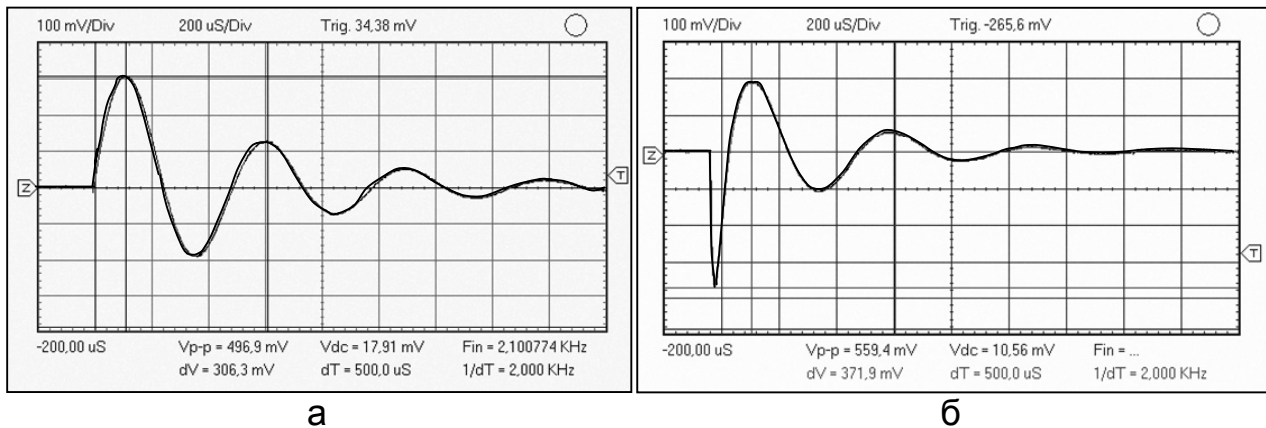


Рисунок 4 – Типичные осциллограммы сигналов в экспериментах:
а – импульс тока в индукторе; б – импульс индуцированного тока

Круговой виток

$$J_{\phi_0}^{(2)}(t, r, \phi) = \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\phi_0) \cdot [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times$$

$$\times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\phi) d\lambda, \quad (1)$$

где ϕ – азимутальный угол в полярной системе координат, привязанной к

витку, в случае одного разреза – $F_n(\phi_0) = \begin{cases} \left(-\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \phi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0; \\ \left(1 - \frac{\phi_0}{\pi} \right), & n = 0; \end{cases}$

$2 \cdot \phi_0$ – величина разреза в терминах азимутального угла, в случае двух радиальных разрезов –

$$F_n(\phi_0) = \begin{cases} 4 \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{\pi n} \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin(n\phi_0), & n \neq 0; \\ 2 \cdot \left(0.5 - \frac{\phi_0}{\pi}\right), & n = 0; \end{cases}$$

$J_k(z)$ – функция Бесселя k -го порядка аргумента – z .

Схемы измерений и результаты вычислений вдоль взаимно перпендикулярных осей (XX, YY) и графические иллюстрации полученных результатов приведены на рис. 5 – 8. В расчётной зависимости (1) $\phi \approx 0$ соответствует измерениям вдоль оси XX, $\phi \approx \pi/2$ – вдоль оси YY.

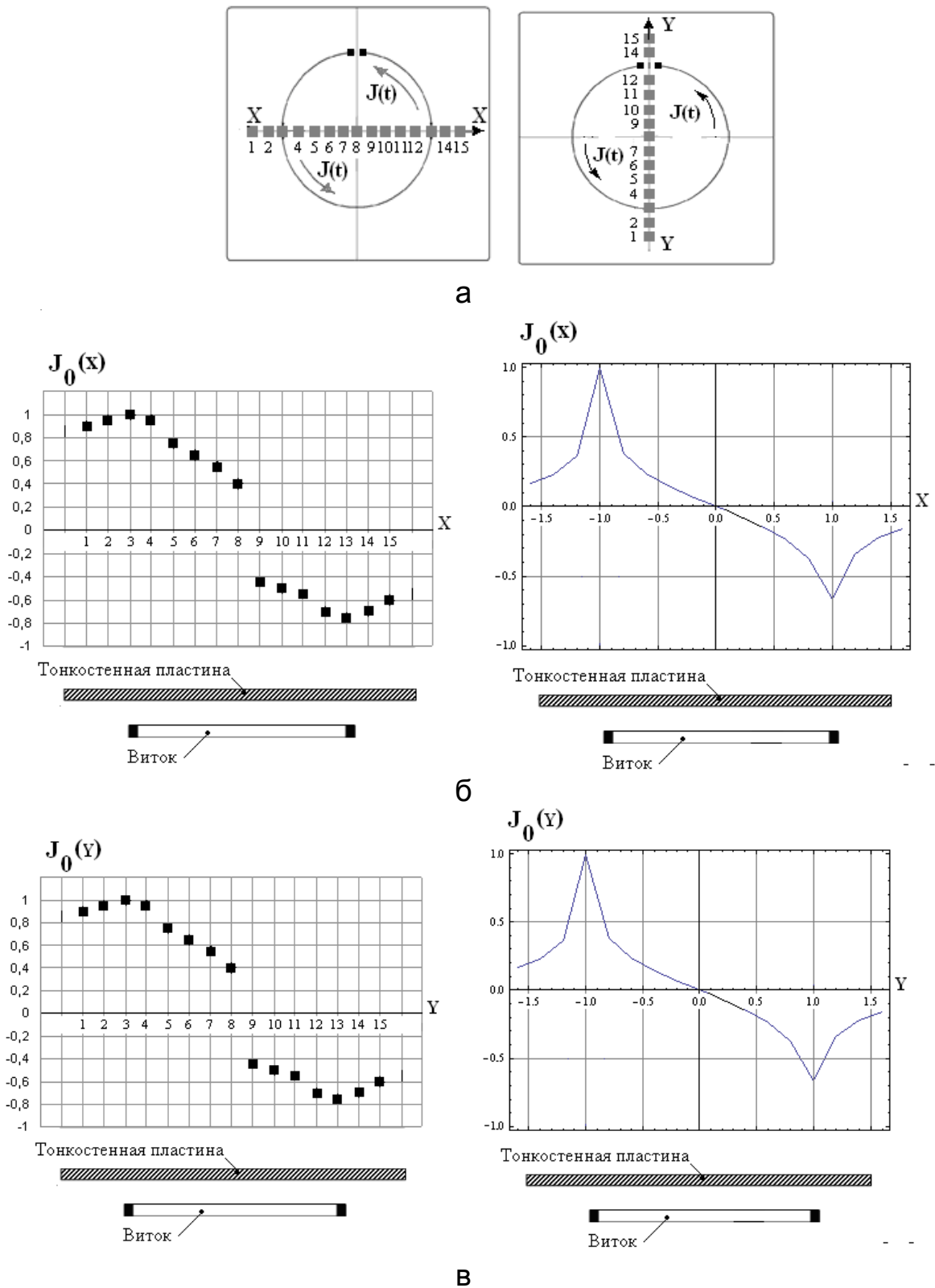
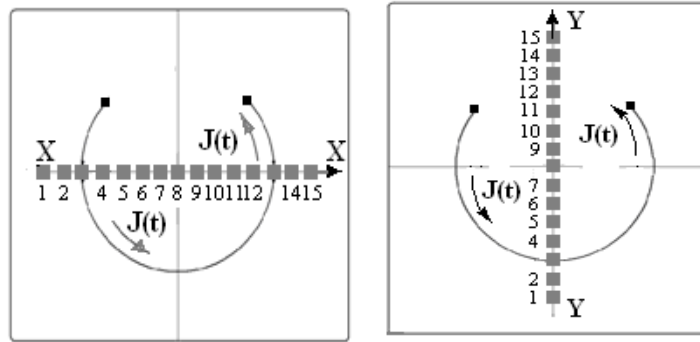


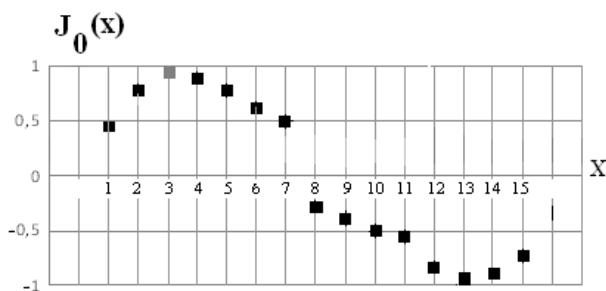
Рисунок 5 – Распределение индуцированных токов в листовом металле вдоль выделенных координатных осей для витка «без разреза»

$$(2 \cdot \phi_0 \approx 6^\circ),$$

а – схемы измерений; б – вдоль оси XX ; в – вдоль оси YY (слева – измерения, справа – расчёт)



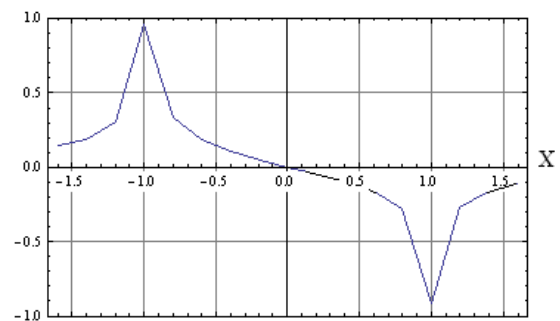
а



Тонкостенная пластина



Виток

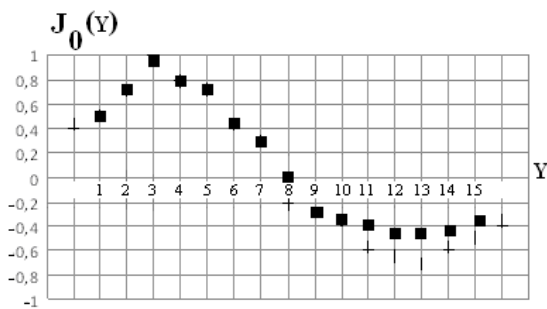
 $J_0(x)$ 

Тонкостенная пластина



Виток

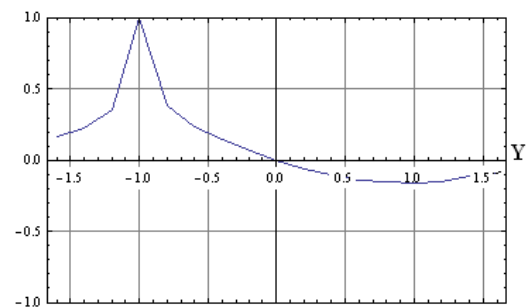
б



Тонкостенная пластина



Виток

 $J_0(y)$ 

Тонкостенная пластина



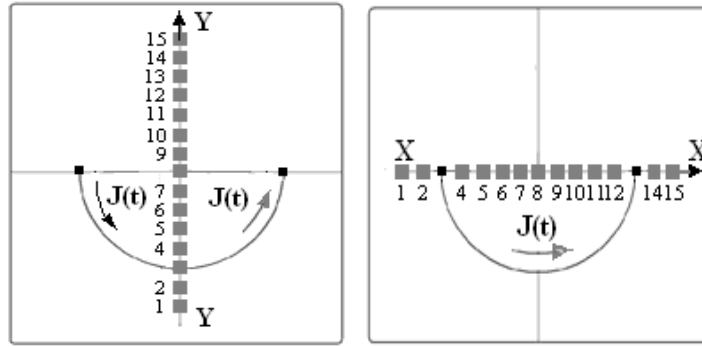
Виток

в

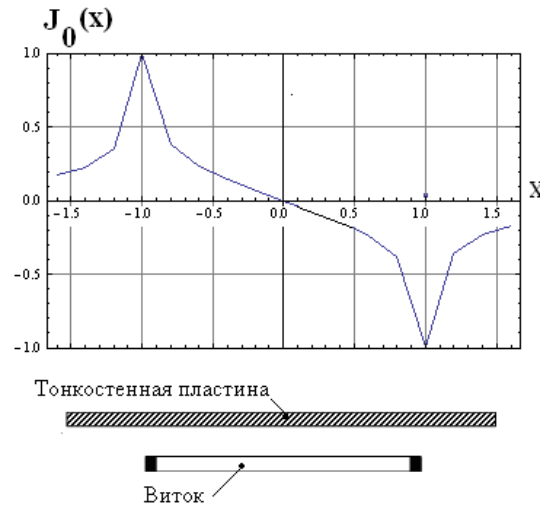
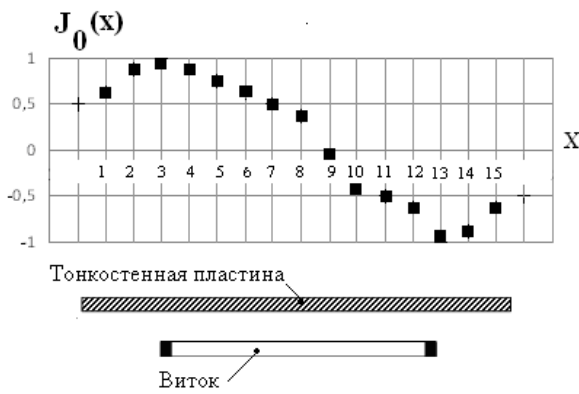
Рисунок 6 – Распределение индуцированных токов в листовом металле вдоль выделенных координатных осей для витка «с разрезом»

($2 \cdot \phi_0 \approx 90^\circ$):

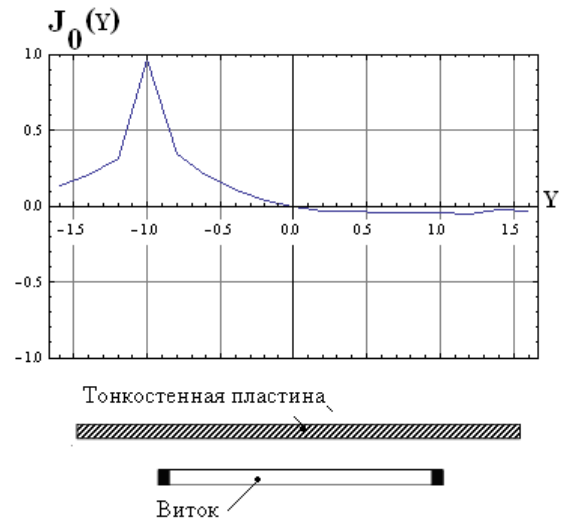
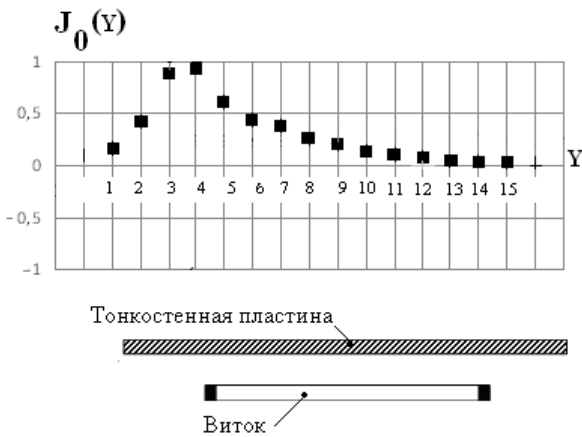
а – схемы измерений; б – вдоль оси ХХ; в – вдоль оси YY
(слева – измерения, справа – расчёт)



а



б



в

Рисунок 7 – Распределение индуцированных токов в листовом металле вдоль выделенных координатных осей для витка «с разрезом»

($2 \cdot \phi_0 \approx 180^\circ$):

а – схемы измерений; б – вдоль оси ХХ; в – вдоль оси YY (слева – измерения, справа – расчёт)

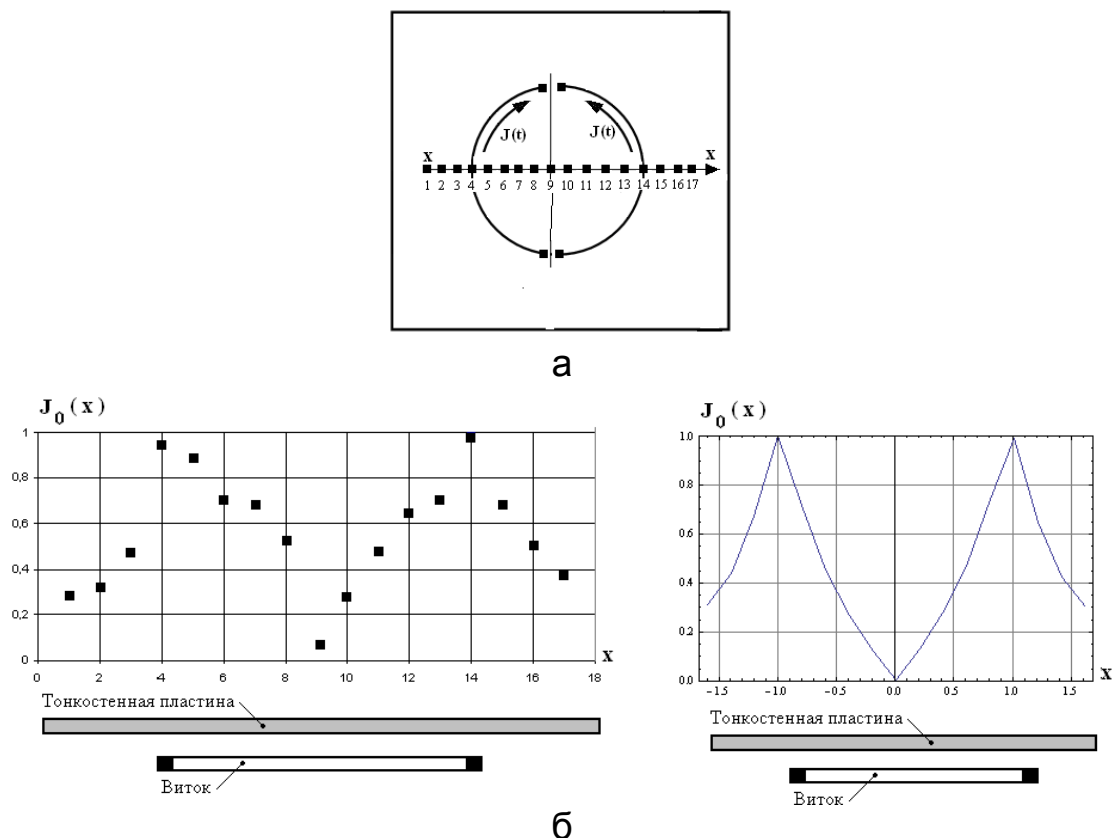


Рисунок 8 – Распределение индуцированных токов в листовом металле вдоль выделенных координатных осей для витка «с двумя разрезами» ($2 \cdot \phi_0 \approx 6^\circ$) и одинаковом направлении равных токов в ветвях:
 а – схемы измерений; б – вдоль оси XX
 (слева – измерения, справа – расчёт)

Проведенные вычисления показали, что

- аналитические соотношения дают достоверную качественную картину пространственного распределения индуцированных токов витком с одним или двумя радиальными разрезами;

- наличие даже достаточно малых радиальных разрезов в витке существенно искажает картину пространственного распределения индуцированных токов по поверхности листового металла: индуцированные токи не концентрируются под витком, имеет место их «растекание» по всей поверхности листового металла;

- выполнение витка в виде двух симметричных круговых ветвей с одинаково направленными возбуждающими токами позволяет увеличить степень однородности пространственного распределения индуцированных токов, хотя в геометрическом центре их амплитуды стремятся к нулю так же, как и в случае витка без разреза.

Прямоугольный виток из двух ветвей с одинаково направленными токами

$$j_y(t, x, y = 0) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{\alpha \cdot A(\alpha, \beta)}{(\alpha^2 + \beta^2)} \cdot e^{-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot h} \sin(\alpha x) \cdot d\alpha d\beta, \quad (2)$$

где $A(\alpha, \beta) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \sin(\alpha(a+g)) \cdot \sin\left(\beta\left(b+\frac{g}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{g}{2}\right) + \right.$
 $\left. + \frac{2}{\beta} \cdot \cos\left(\beta \cdot \frac{(b+g+c)}{2}\right) \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{(b+g-c)}{2}\right) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \left(a+\frac{g}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{g}{2}\right) \right]$

Схемы измерений и результаты вычислений вдоль поперечной оси XX и графические иллюстрации полученных результатов показаны на рис. 9, 10.

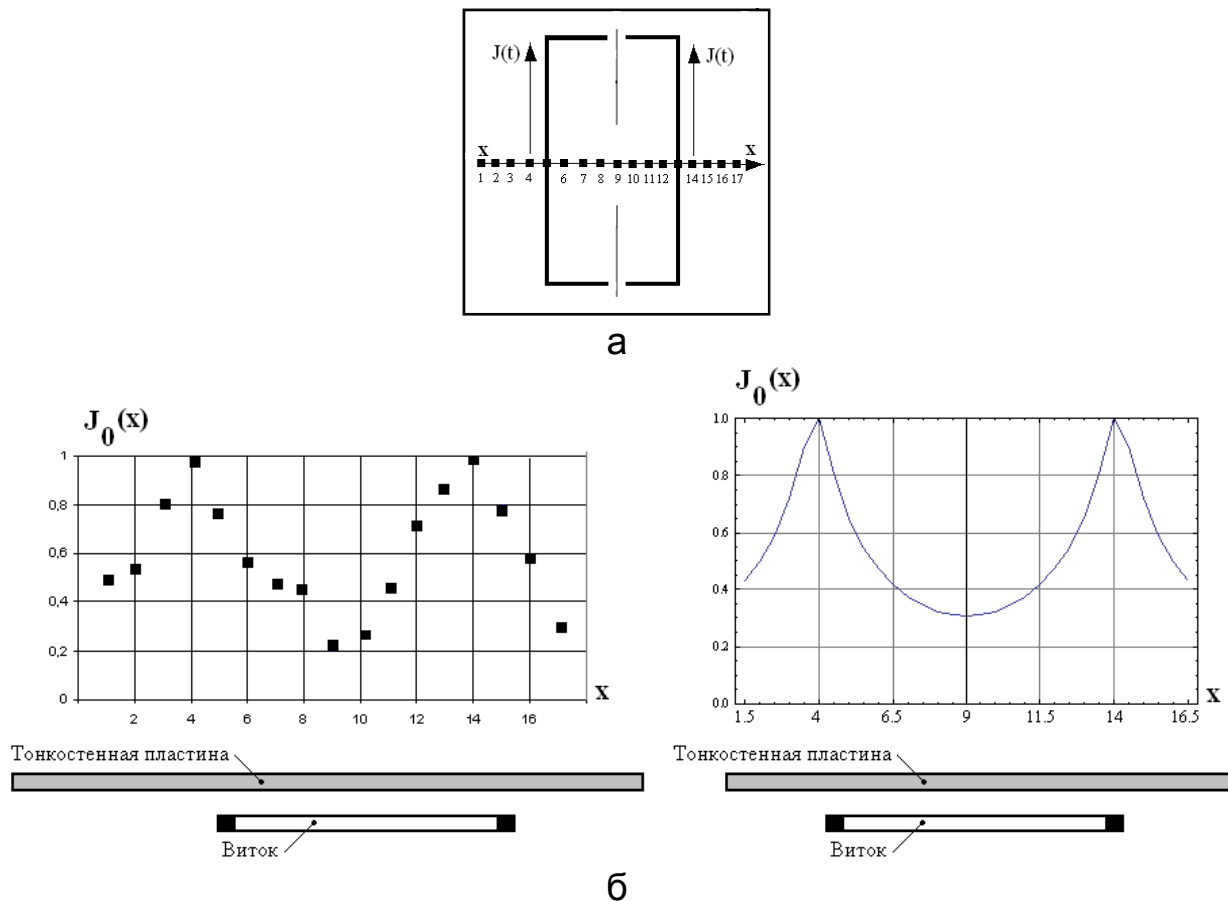


Рисунок 9 – Распределение индуцированных токов в листовом металле вдоль выделенной координатной оси для прямоугольного витка «с двумя разрезами» ($2c \approx 0,002\text{м}$) и одинаковом направлении равных токов в ветвях:

а – схема измерений; б – вдоль оси XX (слева – измерения, справа – расчёт)

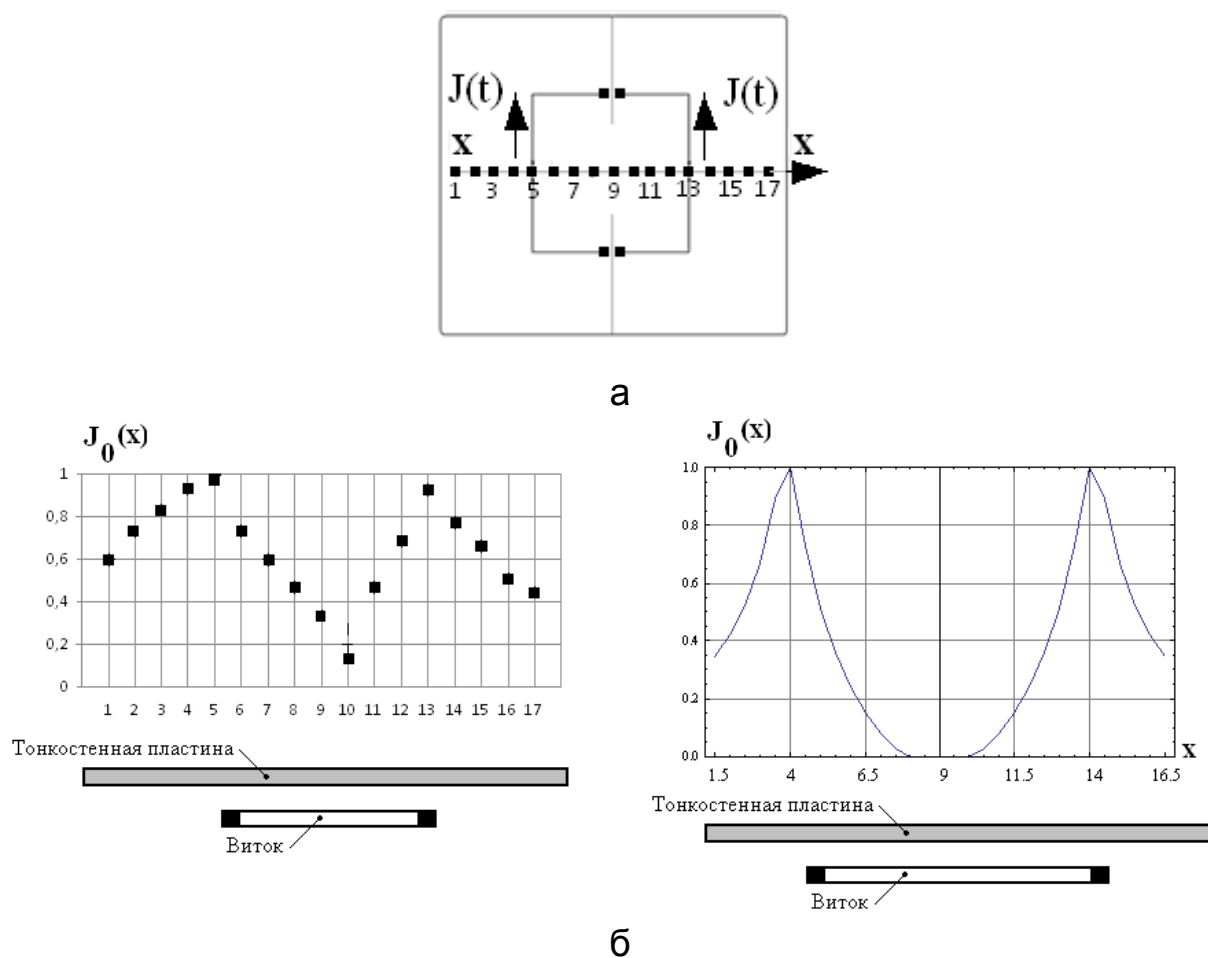


Рисунок 10 – Распределение индуцированных токов в листовом металле вдоль выделенной координатной оси для квадратного витка «с двумя разрезами» ($2c \approx 0,002\text{м}$) и одинаковом направлении равных токов в ветвях:

а – схема измерений; б – вдоль оси XX
(слева – измерения, справа – расчёт)

Основные результаты проведенных исследований сводятся к следующим положениям.

- Так же, как и в случае круговой симметрии, выполнение прямоугольного витка в виде двух ветвей с одинаково направленными токами позволяет увеличить степень однородности распределения индуцированных токов по поверхности листового металла, причём при определённом соотношении длины и ширины ветвей можно добиться отличной от нуля амплитуды вихревых токов в геометрическом центре системы.

- Сравнение с круговой геометрией показывает, что индукторная система с двумя прямоугольными ветвями и одинаковыми направленными продольными токами обладает большими возможностями в формировании картины распределения индуцированных токов, а следовательно, и возбуждаемых электродинамических усилий.

- В случае квадратной формы витка из двух ветвей так же, как и в случае круговой симметрии, амплитуды индуцированных токов стремятся к нулю в геометрическом центре системы.

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования процессов возбуждения индуцированных токов в тонкостенных листовых металлах одиночными «незамкнутыми» витками разной геометрии, как инструментов для внешней рихтовки корпусов самолётов.

2. Выполнение витков в виде двух симметричных ветвей с одинаково направленными токами открывает широкие возможности для вариации формы пространственного распределения индуцированных токов за счёт геометрии системы.

Список использованных источников

1. Батыгин, Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий [Текст] / Ю.В. Батыгин., В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко; под общ. ред. Ю.В. Батыгина. – Х.: Изд-во "МОСТ-Торнадо", 2003. – Т.1.– 288 с.

2. Туренко, А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий [Текст] – Т.3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монограф. / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

3. Бондаренко, А.Ю. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования [Текст] /А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С.66 – 69.

4. Батыгин, Ю.В. Индукционная индукторная система с двойным витком [Текст] / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков // Електротехніка і електромеханіка. Х., 2009. – № 1. – С.59 – 61.

Поступила в редакцию 27.01.2012.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*